

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390084

研究課題名(和文) 回折光学素子を用いたサブ回折限界光パターン生成と顕微秘密分散法への応用

研究課題名(英文) Generation of subdiffraction limit optical patterns using a diffractive optical element and its application to microscale secret sharing scheme

研究代表者

小倉 裕介 (Ogura, Yusuke)

大阪大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：20346191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、伝搬光を用いて、局所的に回折限界よりも微細な光パターン(サブ回折限界光パターン)を生成する手法を開発した。独自のアルゴリズムにより、サブ回折限界光スポットのアレイを生成する回折光学素子を設計し、光学実験によりさまざまな配置の光スポットを生成できることを確認した。設計では、回折限界スポットのサイズの70%、実験でも80%以下のスポットサイズを達成した。サブ回折限界光パターンを多波長で三次元的に生成することにも成功した。また、本手法を物理的限界に依拠した暗号技術に応用し、鍵となるサブ回折限界光パターンを用いた場合にのみ秘密画像が正しく視認されることを実証した。

研究成果の概要(英文)：This study aims at developing a method for generating subdiffraction limit optical patterns, which contain an optical pattern finer than the diffraction limit spot, using propagating light. We designed a diffractive optical element that generated an array of subdiffraction limit spots using our own algorithm. Experimental results showed that various arrangements of subdiffraction limit optical spots were achievable. The spot size was 70% of the diffraction limit spot in design and no more than 80% in experiment. Furthermore, wavelength multiplexing subdiffraction limit optical spots can be generated in three dimensions. We applied the method to visual cryptography which was based on physical limit, and demonstrated that a secret image was visually recognized only by using a designated subdiffraction limit optical pattern as a key.

研究分野：情報フォトンクス

キーワード：回折光学素子 回折限界 暗号化

1. 研究開始当初の背景

回折光学素子は微細構造による回折現象に基づき、光学システムに必要なさまざまな機能を実現する強力な光学デバイスである。この概念を具現化した例であるファンアウト素子は、多数の光スポットを任意の位置に配置する素子であり、光インターコネクタ、レーザー加工、蛍光相関分光など多岐に渡って応用されている。一方で、ファンアウト素子が生成する光スポットのサイズは回折限界で決まり、種々の応用における密度、精度、空間分解能などの性能を制限する要因となっている。

回折限界以下のサイズの光スポットは、例えば、集光領域での光の干渉を制御して得られるスーパーオシレーション現象を利用して生成できる。単一の光スポットの微小化に着目した点像分布関数の変調に基づく、超解像イメージングも達成されている。ただし、この例を含め、これまでに複数の微小スポット生成のための設計法は検討されていない。局所的な微小スポット生成には、本質的に光を空間内に分散させる必要があるが、ファンアウト素子ではむしろ分散する光を効率的に利用できる。ここでは、局所的に回折限界よりも細かい光パターンを含むものをサブ回折限界光パターンとよぶ。

本研究で生成するサブ回折限界光パターンは、あくまで伝搬光を利用したもので、並列伝搬性や物質へのリモートアクセス能力など近接場光にはない特徴を備えており、独特の利用法が考えられる。例えば、サブ回折限界光パターンを一つの秘密分散画像とする画像情報暗号化技術は有望である。秘密分散法は、秘密情報（画像情報）を複数の情報に分散させ、それら分散情報を組み合わせることで初めて秘密情報の復号を可能とする暗号化手法である。サブ回折限界光パターン生成は物理的限界の境界を扱う技術であり、秘密分散法に適用すると、通常の情報セキュリティとは異なる物理特性に依拠したセキュリティと簡便な物理実装の両立が可能である。ただし、サブ回折限界スケールの秘密分散法の実施例はなく、概念、設計手法、実装をはじめ詳細な検討が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、回折光学素子を用いて単一の回折限界光スポットよりも細かい複数のスポットを持つ光パターンを生成する手法の構築をめざす。本手法は、集光レンズと回折光学素子だけの簡便な実装が可能であり、並列伝搬性や物質へのリモートアクセス能力が担保されるため、さまざまな並列光システムの性能向上や新機能創出に直結する。その実現例として、顕微スケールでの秘密分散法に基づく画像情報暗号化技術を開発する。これらの実証・性能評価を通して、サブ回折限界スケールの光物理と情報科学を融合したセキュリティ技術の能力を示し、真贋判定や

原本性保証などへの適用へむけた技術基盤を構築する。具体的には以下の研究目標を設定した。

- (1) 回折光学素子の設計手法の確立
- (2) 光学実験による光パターンの実証と性能評価
- (3) 顕微秘密分散法の実証

3. 研究の方法

サブ回折限界光パターン生成の概念を図 1 に示す。レーザーからの平行光をレンズで集光すると、集光スポットは回折限界で決まるサイズをもつ。これに対し、集光レンズ直前に回折光学素子を置くと、その変調作用によりレンズ焦平面で得られるパターンが変化する。回折光学素子を適切に設計することで、サブ回折限界のスポットアレイが得られる。なお、回折光学素子は位相変調型とする。設計は、さまざまな拘束条件を組み込むことが可能な反復フーリエ変換アルゴリズムを基に行う。一般には、出力面の拘束条件には強度のみが考慮されるが、隣接スポットの間に零点を作ってこれらを分離するため、位相も考慮した拘束条件を導入する。さらに、パターン生成の自由度を高めるため、目的のパターンが関与しない外側の領域では、「強度がある値以下」という条件のみの緩い拘束条件を採用する。

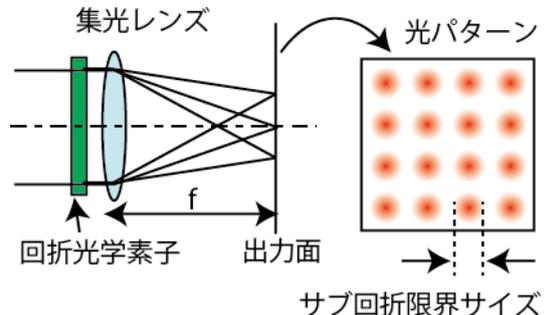


図 1 回折光学素子を用いたサブ回折限界光パターンの生成

提案アルゴリズムにより、さまざまなサブ回折限界光パターンを生成する回折光学素子を設計できることを確認する。また、パラメータに対するスポットサイズや光利用率などの性能をシミュレーションにより評価する。さらに、このアルゴリズムを多次元（波長多重・三次元）素子の設計に拡張する。多次元化による性能劣化を避けるため、反復ごとに、各波長の位相分布を統合する処理とクロストーク抑制条件を導入する。各波長、各出力面で独立したサブ回折限界光パターンが生成されることを確認する。

次に、設計した素子の機能を実証するため、回折光学素子の実装に空間光変調器を用いた光パターン生成系を構築する。レンズの開口数 (NA) による変化を検証するため、NA の異なる 2 つの集光レンズを光学系に組み込み、生成される光パターンを独立に観察する。

スポットの配置や光スポット径をシミュレーションと比較し、所望の性能が得られることを確認する。多次元化能力の検証は、2 波長 2 出力面でサブ回折限界光パターンを生成する素子を用いて行う。

サブ回折限界光パターン生成の応用として、秘密分散に基づく視覚復号型暗号を検討する。視覚復号型暗号法では、複数の分散画像を重ね合わせるにより、画素ごとに一種の光演算を実行し、コンピュータによる処理を施すことなく復号画像を得る。本研究では、サブ回折限界光パターンを鍵、反射率分布を暗号化情報として用いる。鍵として、通常の一様照明、および、光パターンを用いた場合のそれぞれについて得られる復号画像を観察し、暗号化手法として正当性を示す。また、シミュレーションにより、復号性能を定量的に評価するとともに、復号に必要なアライメント精度を明らかにする。

4. 研究成果

まず、単一波長、単一出力面で光パターンを生成する回折光学素子について検討した。その一例を図 2 に示す。図 2(a)は、 3×3 のスポットを生成する素子の位相変調分布の設計結果、図 2(b)は出力パターンの計算結果である。ただし、注目領域のみを抽出して表示している。また、サイズの比較のため、回折限界スポットを右側に示している。回折限界スポットよりも小さなスポットが規則的に配置したパターンが得られていることがわかる。図 2(c)は実験で観察された光パターンである。実験光学系における集光レンズの NA は 0.0063 (集光系 1) 及び 0.056 (集光系 2) であり、ここでは集光系 1 による観察パターンのみを示した。設計とよく合致していることが確認できる。また、これらのスポットのサイズ (半値全幅) を図 2(d) に示す。回折限界スポットのサイズで規格化している。すべてのスポットが回折限界スポットよりも小さくなっており、設計では平均で約 70%、実験でも 80% 以下の縮小率が得られた。これらの結果より、本手法の基本概念を実証するとともに、提案アルゴリズムの有効性を示すことができた。

光学素子の光利用効率は重要な性能指標である。そこで、シミュレーションにより光利用効率を評価した。その結果、光利用効率はスポット縮小率に強く依存することがわかった。例えば、回折光学素子への入射光としてガウシアンビームを想定すると、スポット縮小率が 70% の場合には、光利用効率は 1% 程度となる。この値を向上するための方策について検討したところ、入射光をドーナツビームに変更することで光利用効率は 10 倍以上向上することを見出した。本手法は高周波強調の一種であり、回折光学素子の中心部よりも周辺部の変調分布が光スポットの微細化に強く影響することがその理由として考えられる。

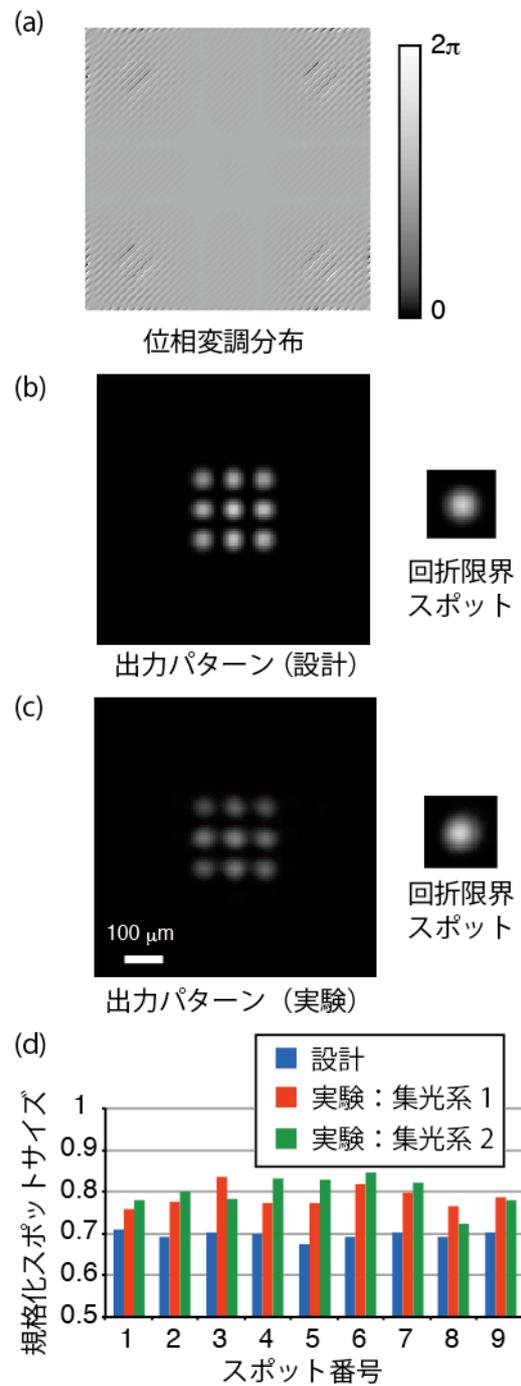


図 2 (a) 3×3 スポットを生成する素子の位相変調分布. (b) 出力パターンの計算結果. (c) 出力パターンの実験観察像. (d) 各スポットのサイズ

次に多次元光パターン生成の回折光学素子の実証実験を行った。多次元化は、本手法の応用領域の拡大に有効である。632.8nm、532.0nm の 2 つの波長を用いた。また、集光レンズの焦点距離は 400mm であり、焦平面の前後 200mm の距離にある 2 面を出力面として設定した。(それぞれ出力面 1、2 とする。) それぞれの出力面で波長ごとに異なる位置に 4×3 、 3×4 、 2×3 、 3×2 の光パターンを生成する。観察された光パターンを図 3 に示す。各波長、各出力面で設定した配置のスポ

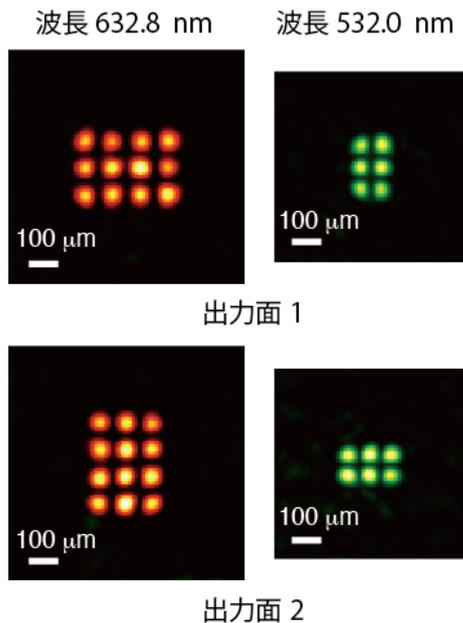


図 3 観察された多次元スポットアレイ。

ットアレイが得られた。また、すべてのスポットのサイズは回折限界スポットよりも小さく、平均で 79%の縮小率であった。以上の結果から、三次元空間に波長多重サブ回折限界スポットアレイが生成されることを実証できた。

シミュレーションにより、さまざまな評価を行った。例えば、性能の波長数依存性を調査したところ、平均スポットサイズの観点からは波長数の増加に伴う顕著な性能劣化が見られないことがわかった。また、少なくとも 7 波長多重において、すべてのスポットが回折限界スポットよりも小さなスポットアレイを生成できることを確認した。

最後に、本手法を応用した視覚復号型暗号を検討した。秘密画像を 2 枚の分散画像として符号化し、それぞれをサブ回折限界光パターン（鍵）と反射率分布をもつ基板（暗号化画像）として実装する。鍵パターンで基板を照明し、結像系を介して観察すると、秘密画像が復号される。各分散画像は回折限界よりも細かい画素で構成されており、超解像処理を適用しない限りは分散画像自体を取得することができないため、高いセキュリティ強度が得られる。3×3 画素をもつ 2 値の秘密画像を用いて実証実験を行った。その結果、正しい鍵パターンを照明として用いると、復号された秘密画像が視認できることを確認した。復号した画像と秘密画像の一致度を、ゼロ平均正規化相互相関係数を用いて評価したところ、正しい秘密画像に対して最も高い値が得られた。これより、定量的観点からも、秘密画像が復号されたと言える。一方、一様な照明光を用いて復号した場合には、すべての画素の値が“1”の画像に対する相関が最も高くなり、正しく復号されないことがわかった。期待どおり、物理的限界により情報の秘匿がなされる一方で、鍵パターンを用いるこ

とで簡便に情報を読み出せることを実証できた。なお、本手法にマクロスケールでのセキュリティを付加できるような潜像手法も考案している。これらの結果は、回折限界付近での光の振る舞いを利用したセキュリティ技術の能力を示すものであり、サブ回折限界スケールの光物理に基づく新しいセキュリティ手法の開発につながる。

本研究で、伝搬光を用いて回折限界よりも細かい光パターンを生成する手法を開発できたことは重要な意味をもつ。伝搬光は、並列伝搬性、非接触アクセス性、多重性、システム簡便性など優れた特性を有しているためである。光パターンの細かさは、観察、計測、加工、情報処理などの光応用技術における分解能や精度に強く影響するため、これらの性能向上がもたらされると期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Yusuke Ogura, Masahiko Aino, and Jun Tanida, “Diffractive fan-out elements for wavelength-multiplexing subdiffraction-limit spot generation in three dimensions,” *Applied Optics*, Vol. 55, pp. 6371–6380, 査読有, 2016. DOI: 10.1364/AO.55.006371
- ② Yusuke Ogura, Masahiko Aino, and Jun Tanida, “Design and demonstration of fan-out elements generating an array of subdiffraction spots,” *Optics Express*, Vol. 22, pp. 25196–25207, 査読有, 2014. DOI: 10.1364/OE.22.025196

[学会発表] (計 10 件)

- ① 生源寺類, 小倉裕介, “複屈折結晶を用いた潜像技術,” 2017 年電子情報通信学会総合大会, Mar. 23, 2017, 名城大学 (愛知) .
- ② Yusuke Ogura and Jun Tanida, “Subdiffraction limit optical pattern generation and its application to security,” The 6th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2016), Dec. 22, 2016, 札幌コンベンションセンター (北海道) .
- ③ Yusuke Ogura and Jun Tanida, “Diffractive optical elements for multi-dimensional subdiffraction-limit spot generation: design, demonstration, and characterization,” SPIE/COS Photonics Asia, Oct. 12, 2016, Beijing (China).
- ④ 相野匡彦, 小倉裕介, 谷田純, “サブ回折限界パターンを用いた画像暗号化技

- 術”, 第 63 回応用物理学会春期学術講演会, Mar. 21, 2016, 東京工業大学 (東京).
- ⑤ 小倉裕介, 相野匡彦, 谷田純, “波長多重サブ回折限界スポットアレイを生成するファンアウト素子の特性評価”, レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会, Jan. 9, 2016, 名城大学 (愛知).
 - ⑥ Yusuke Ogura, Masahiko Aino, and Jun Tanida, “Multi-dimensional generation of sub-diffraction-limited optical patterns using propagating light,” The 5th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2015), Sept. 18, 2015, Gangneung (Korea).
 - ⑦ 相野匡彦, 小倉裕介, 谷田純, “伝搬光を用いた波長多重サブ回折限界スポットの生成,” 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, Sept. 14, 2015, 名古屋国際会議場 (愛知).
 - ⑧ Masahiko Aino, Yusuke Ogura, and Jun Tanida, “Generation of Multiple Sub-diffraction-limit Spots in 3D Space with Propagating Light,” 14th Workshop in Information Optics, Jun. 4, 2015, 京都ガーデンパレス (京都).
 - ⑨ 相野 匡彦, 小倉 裕介, 谷田 純, “空間光変調器を用いたサブ回折限界スポットアレイの生成と評価,” Optics & Photonics Japan 2014, Nov. 7, 2014, 筑波大学 (東京).
 - ⑩ Yusuke Ogura, Masahiko Aino, Jun Tanida, “Design and demonstration of diffractive fan-out elements generating an array of sub-diffraction-limit spots,” Digital Holography & 3-D Imaging (DH), July 17, 2014, Seattle (USA).

[その他]

ホームページ等

<http://www-lip.ist.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小倉 裕介 (OGURA, Yusuke)

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：20346191

(2) 研究分担者

生源寺 類 (SHOGENJI, Rui)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：90432195

(3) 研究協力者

相野 匡彦 (AINO, Masahiko)